

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
27 octobre 2005 (27.10.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2005/101141 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ : G04F 5/14,
H03L 7/26

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2005/000754

(22) Date de dépôt international : 29 mars 2005 (29.03.2005)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
04 03289 30 mars 2004 (30.03.2004) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCI-
ENTIFIQUE (C.N.R.S.) [FR/FR]; 3, rue Michel Ange,
F-75016 PARIS (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : DI-
MARCO, Noël [FR/FR]; 27 rue Auguste Petit, F-91150
ETAMPES (FR). GUERANDEL, Stéphane [FR/FR]; 47
rue Dr Roux, F-92330 SCEAUX (FR). ZANON, Thomas
[FR/FR]; 49 boulevard de Clichy, F-75009 PARIS (FR).
HOLLEVILLE, David [FR/FR]; 77 rue Broca, F-75013
PARIS (FR).

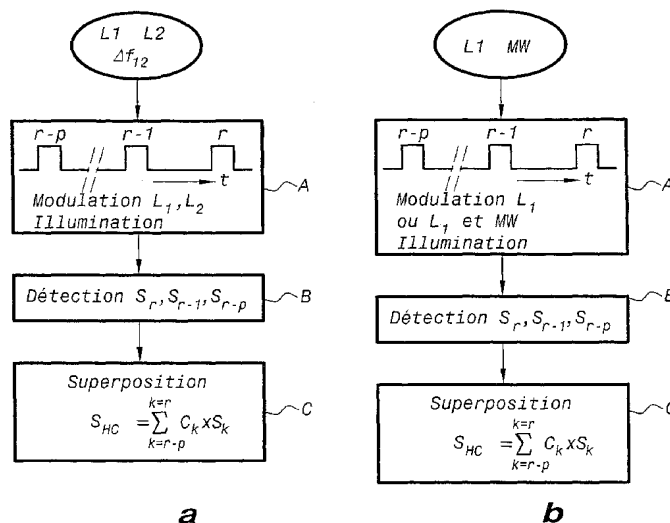
(74) Mandataires : HABASQUE, Etienne etc.; Cabinet
LAVOIX, 2, Place d'Estienne d'Orves, F-75441 PARIS
CEDEX 09 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,
KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR MODULATING AN ATOMIC CLOCK SIGNAL WITH COHERENT POPULATION TRAPPING
AND CORRESPONDING ATOMIC CLOCK

(54) Titre : PROCÉDÉ DE GÉNÉRATION D'UN SIGNAL D'HORLOGE ATOMIQUE A PIÉGEAGE COHÉRENT DE POPU-
LATION ET HORLOGE ATOMIQUE CORRESPONDANTE



A. MODULATING LASER BEAMS, ILLUMINATION
B. DETECTING CURRENT PULSE AND PRECEDING PULSES
C. SUPERIMPOSITION OF PULSES TO GENERATE COMPENSATED ATOMIC CLOCK SIGNAL

(57) Abstract: The invention concerns a method for modulating an atomic clock signal and a corresponding atomic clock. The laser beams (L_1, L_2) are pulse-modulated in amplitude to illuminate (A) an interactive medium. A detection (B) of the current pulse (S_r) and of the pulses (S_{r-1} to S_{r-p}) preceding said current impulse is performed. Said pulses are superimposed (C) by linear combination to generate a compensated atomic clock signal (S_{HC}) whereof the spectral width is minimized. The invention is applicable to atomic clocks with pulsed interrogation whereof the interactive medium consists of thermal or laser-cooled atoms.

[Suite sur la page suivante]

WO 2005/101141 A1



MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés** (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) **Abstré :** L'invention concerne un procédé de génération d'un signal d'horloge atomique et une horloge atomique correspondante. Les faisceaux laser (L_1 , L_2) sont modulés en amplitude par impulsions pour illuminer (A) un milieu d'interaction. Une détection (B) de l'impulsion courante (S_r) et des impulsions (S_{r-1} à S_{r-p}) précédant cette impulsion courante est réalisée. Une superposition (C) par combinaison linéaire des impulsions précitées est réalisée pour engendrer un signal d'horloge atomique compensé (S_{HC}) dont la largeur spectrale est minimisée. Application de des horloges atomiques à interrogation pulsée dont le milieu d'interaction est constitué par des atomes thermiques ou refroidis par laser.

Procédé de génération d'un signal d'horloge atomique à piégeage cohérent de population et horloge atomique correspondante.

Les horloges atomiques à piégeage cohérent de population, désignées horloges CPT pour « Coherent Population Trapping » sont connues de l'état de la technique.

5 D'une manière générale, ainsi que représenté en figure 1a, les horloges atomiques utilisent un milieu d'interaction, formé en général par des atomes de césium ou de rubidium excités par un signal radio-électrique engendré par un oscillateur local LO et un synthétiseur S à une fréquence d'excitation et formé par un signal micro-onde à 6,8 GHz respectivement 9,2 GHz pour le rubidium et le césium. Les atomes du milieu d'interaction sont excités entre deux niveaux
10 d'énergie e et f représentés en figure 1b. Ce mode d'excitation est désigné mode d'interrogation de Rabi si l'interaction est continue et mode d'interrogation de Ramsey si l'interrogation repose sur deux courtes interactions séparées par un temps mort.

Le signal de réponse issu de l'interaction a une amplitude fonction de
15 l'accord à la résonance du signal d'excitation. La détection du signal de réponse peut être effectuée par absorption optique, par sélection magnétique, fluorescence optique ou détection magnétique.

Un système d'asservissement de l'oscillateur local à partir du signal de réponse permet d'obtenir en sortie de cet oscillateur un signal périodique S_u ,
20 présentant des qualités d'exactitude et de stabilité de fréquence comparables à celles de la fréquence de résonance $e \rightarrow f$.

Reprenant le principe général de l'asservissement précédemment décrit, les horloges CPT utilisent également un milieu d'interaction illuminé par deux ondes laser et mettent en œuvre un mode d'interrogation continu.

25 Dans un mode de réalisation antérieur, le milieu d'interaction constitué par du sodium est spatialement séparé en deux zones d'interaction distinctes, séparées par une distance de 30 cm.

Les faisceaux laser permettent d'engendrer une résonance par transition Raman à 1 772 MHz, la frange centrale du motif de franges de Ramsey étant
30 ramenée à une largeur de 650 Hz, grâce à une interaction produite dans les zones d'interaction.

Pour une description plus détaillée de ce type d'horloge atomique on pourra utilement se reporter à l'article intitulé « Observation of Ramsey Fringes Using a simulated, Resonance Raman Transition in a Sodium Atomic Beam » publié par T.E. Thomas, P.R. Hemmer, and S. Ezekiel Research Laboratory of
5 Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02 139 et C.C. Leiby, Jr., R.H. Picard, and C.R. Willis, Rome Air Development Center, Hanscom Air Force Base, Massachusetts 01 731 PHYSICAL REVIEW LETTERS Volume 48, Number 13, 29 March 1982.

De manière générale, les horloges atomiques de type CPT mettent en
10 œuvre une interrogation en mode continu, au moyen de deux ondes laser cohérentes en phase. Chaque onde laser est quasi résonnante avec une transition optique des atomes $2 \rightarrow e$ et $2 \rightarrow f$ et la différence entre les fréquences des deux ondes est proche de la fréquence de référence atomique $f \rightarrow e$. Lorsque l'accord $f \rightarrow e$ à la résonance est satisfait, les atomes du milieu d'interaction sont piégés
15 dans une superposition cohérente des états f et e correspondant à un état noir. On observe une diminution de l'amplitude de l'absorption des ondes laser, une diminution de l'amplitude du signal de fluorescence. La superposition cohérente d'états atomiques est aussi associée à une aimantation engendrant une onde électromagnétique oscillant à la fréquence de la transition $e \rightarrow f$ dans le domaine
20 des micro-ondes.

L'absorption ou l'émission de fluorescence sont minimales et le champ de l'onde électromagnétique émise a une amplitude maximale à la résonance. Le signal d'horloge atomique correspond à la variation de l'amplitude du signal détecté par absorption, fluorescence ou émission micro-onde, en fonction de la valeur de la
25 différence de fréquence des ondes laser.

Dans tous les types d'horloge atomique CPT connus à l'heure actuelle, l'interrogation du milieu d'interaction est continue, les ondes laser interagissant continûment avec les atomes du milieu d'interaction.

Toutefois, dans les types d'horloges atomiques précités, une trop forte
30 intensité d'illumination du milieu d'interaction par les ondes laser provoque l'élargissement des raies de résonance obtenues, en raison de la saturation optique des atomes du milieu d'interaction.

Cet inconvénient conduit à une dégradation de la stabilité de la fréquence du signal d'horloge atomique.

Pour cette raison, dans les horloges atomiques CPT actuellement existantes, on tente de résoudre le problème technique précité en réduisant simplement l'intensité d'illumination du milieu d'interaction par les faisceaux laser utilisés.

- 5 Une telle mesure ne permet pas de résoudre le problème technique précité car elle se traduit, en fait, par une difficulté accrue de détection des signaux d'horloge atomique, de faible amplitude, issus de l'interaction.

Les signaux d'horloge atomique de trop faible amplitude précités sont détectés dans des conditions de rapport signal à bruit dégradées, ce qui se traduit,
10 à nouveau, par une dégradation de la stabilité de la fréquence de l'horloge atomique.

La présente invention a pour objet de remédier au problème technique de la saturation optique des milieux d'interaction des horloges atomiques, notamment horloges CPT ou autres, tout en maintenant des conditions de rapport
15 signal à bruit non dégradées.

Un autre objet de la présente invention est en outre, grâce à un traitement spécifique du signal de réponse engendré par l'interrogation du milieu d'interaction dans les horloges atomiques CPT actuelles, l'obtention d'une augmentation du contraste des franges d'interférence en mode de Ramsey et d'une
20 diminution des variations lentes d'amplitude ou dérives du signal d'horloge atomique, engendrées notamment par les fluctuations irréductibles des paramètres de fonctionnement, tels que la fréquence et l'amplitude des lasers d'interrogation du milieu d'interaction.

Un autre objet de l'invention est, enfin, la mise en œuvre d'un procédé
25 de génération d'un signal d'horloge CPT et d'une horloge CPT correspondante permettant une miniaturisation de ce type d'horloge en vue de la production industrielle d'horloges dans lesquelles la cellule d'interaction n'excède pas un volume de quelques mm^3 .

Le procédé de génération d'un signal d'horloge atomique à piégeage
30 cohérent de population, objet de la présente invention, met en œuvre une première et une deuxième onde laser cohérentes en phase, chacune sensiblement en résonance avec une transition optique des atomes d'un milieu d'interaction. La superposition cohérente des états atomiques correspondant au piégeage cohérent de population d'atomes permet d'engendrer un signal de réponse présentant une

amplitude extrême à la résonance et représentative du signal d'horloge atomique correspondant à la variation d'amplitude du signal détecté en fonction de la valeur de la différence de fréquence de la première et de la deuxième onde laser cohérentes en phase.

5 Il est remarquable en ce qu'il consiste au moins à moduler en synchronisme par impulsions successives l'intensité de la première et de la deuxième onde laser, selon un facteur de forme déterminé entre un niveau haut et un niveau bas d'intensité, le signal de réponse engendré pendant une impulsion courante dépendant de l'état atomique engendré pendant au moins une impulsion
10 précédant cette impulsion courante et de l'évolution de cet état atomique pendant la durée de niveau bas d'intensité séparant ces impulsions.

Le signal de réponse est détecté et superposé par combinaison linéaire du signal de réponse engendré pendant cette impulsion courante et au moins une impulsion précédant cette impulsion courante, pour engendrer un signal d'horloge
15 atomique compensé résultant, dont la largeur spectrale est minimisée.

L'horloge atomique à interrogation pulsée, objet de la présente invention, comprend au moins un module optique d'interrogation permettant d'engendrer un premier et un deuxième faisceau laser cohérents en phase, chacun sensiblement en résonance avec une transition optique des atomes d'un milieu d'interaction, une
20 cellule d'interaction comportant ce milieu d'interaction, illuminé en fonctionnement par le premier et le deuxième faisceau laser cohérents en phase, pour engendrer un signal de réponse présentant une amplitude extrême à la résonance et correspondant à la variation d'amplitude du signal détecté en fonction de la différence de fréquence du premier et du deuxième faisceau laser cohérents en
25 phase et un module de détection de ce signal de réponse adapté à la longueur d'onde et à l'amplitude du signal de réponse.

Elle est remarquable en ce qu'elle comporte en outre un bloc de modulation par impulsions de l'intensité du premier et du deuxième faisceau laser entre un niveau haut et un niveau bas d'intensité. Ce bloc de modulation est placé
30 sur le trajet du premier et du deuxième faisceau laser, en amont de la cellule d'interaction, pour engendrer en synchronisme un premier et un deuxième faisceau laser pulsé. L'interaction entre le premier respectivement le deuxième faisceau laser et le milieu d'interaction est sensiblement limitée à la durée de chaque impulsion successive correspondant à un niveau haut d'intensité et le signal de

réponse engendré pendant une impulsion courante dépend de l'état atomique engendré pendant au moins une impulsion précédant cette impulsion courante et de l'évolution de cet état atomique pendant la durée de niveau bas d'intensité séparant ces impulsions .

5 En outre, le module de détection comprend un module sommateur par combinaison linéaire du signal de réponse engendré pendant cette impulsion courante et du signal de réponse engendré pendant au moins une impulsion précédant cette impulsion courante. Le module sommateur par combinaison linéaire permet d'engendrer un signal d'horloge atomique compensé résultant, dont
10 la largeur spectrale est minimisée.

Le procédé et l'horloge atomique à piégeage cohérent de population objets de la présente invention trouvent application à la mise en œuvre industrielle de garde-temps ou de référence de fréquence embarqués de très faible encombrement, utilisables notamment dans les applications spatiales.

15 Ils seront mieux compris à la lecture de la description et à l'observation des dessins ci-après dans lesquels, outre les figures 1a et 1b relatives à l'art antérieur :

 - la figure 2a représente, à titre purement illustratif, un organigramme des étapes essentielles de mise en œuvre du procédé objet de la présente
20 invention ;

 - la figure 2b représente, à titre purement illustratif, un organigramme des étapes essentielles d'une variante de mise en œuvre du procédé objet de l'invention appliqué à une onde laser unique et à un signal radiofréquence d'excitation du milieu d'interaction ;

25 - la figure 2c représente, à titre purement illustratif, au point 1), un chronogramme des signaux d'impulsions de faisceau laser pulsé susceptibles d'être utilisés pour la mise en œuvre du procédé objet de l'invention décrit en figure 2a ou 2b, et, au point 2), un chronogramme du signal de réponse obtenu après détection en sortie de la cellule d'interaction ;

30 - la figure 3 représente, à titre purement illustratif, un schéma fonctionnel d'une horloge atomique CPT ou autre conforme à l'objet de la présente invention, permettant la mise en œuvre du procédé décrit en liaison avec les figures 2a, 2b et 2c ;

- la figure 4a représente, à titre illustratif, un schéma détaillé d'un module de traitement du signal de réponse après détection, dans un mode de réalisation préférentiel non limitatif, ce module de traitement du signal de réponse étant plus particulièrement adapté à l'exécution d'un traitement numérique dédié ;

5 - la figure 4b représente, à titre illustratif, un chronogramme d'exécution d'opérations sur des valeurs échantillonnées d'impulsions successives de signal de réponse, plus particulièrement sur une impulsion courante et au moins une impulsion précédant cette impulsion courante, les opérations conduites sur les valeurs échantillonnées précitées permettant en particulier d'améliorer
10 sensiblement la pureté spectrale et le contraste du signal d'horloge atomique compensé résultant obtenu, suite à l'exécution de ces opérations ;

 - la figure 4c représente, à titre illustratif, un diagramme amplitude-fréquence du désaccord Raman, désaccord de la différence de fréquence entre les deux ondes laser et du motif de franges de Ramsey obtenu en sortie du module de
15 traitement dédié représenté en figure 3, après application d'une superposition par combinaison linéaire du signal de réponse engendré pendant une impulsion courante et au moins une impulsion précédant cette impulsion courante.

 Le procédé de génération d'un signal d'horloge atomique à piégeage cohérent de population objet de la présente invention sera maintenant décrit en
20 liaison avec les figures 2a, 2b et 2c.

 D'une manière générale, on rappelle que, conformément aux principes du mode opératoire des horloges atomiques CPT, le procédé objet de la présente invention est mis en œuvre à partir d'une première onde laser L_1 et d'une deuxième onde laser L_2 cohérentes en phase.

25 En référence à la figure 1b, chacune des ondes laser précitées est sensiblement en résonance avec une transition optique des atomes d'un milieu d'interaction, les ondes laser L_1 et L_2 étant réputées émises à une fréquence f_1 et f_2 et à leur longueur d'onde correspondante dans le vide ou l'air, la différence de fréquence des ondes laser précitées étant notée Δf_{12} . De préférence, les ondes
30 laser L_1 et L_2 sont polarisées soit circulairement soit linéairement de manière orthogonale.

 La superposition cohérente des états atomiques correspondants au piégeage cohérent de population d'atomes tel que représenté en figure 1b engendre un signal de réponse dans le domaine micro-onde présentant une

amplitude extrême à la résonance et représentative du signal d'horloge atomique correspondant à la variation d'amplitude du signal de réponse détecté en fonction de la valeur de la différence de fréquence Δf_{12} de la première et la deuxième ondes laser cohérente en phase L_1 et L_2 .

5 On comprend, en particulier, que le mode d'interaction de la première et de la deuxième ondes avec le milieu d'interaction correspond au mode d'interaction en continu connu de l'état de la technique du point de vue physique.

Toutefois, et selon un aspect particulièrement remarquable du procédé objet de l'invention, celui-ci consiste au moins en une étape A à moduler en
10 synchronisme par impulsions successives l'intensité de la première et de la deuxième ondes laser L_1 , L_2 selon un facteur de forme déterminé, entre un niveau haut et un niveau bas d'intensité.

Sur la figure 2a, à l'étape A de celle-ci, on a représenté les ondes laser L_1 et L_2 modulées en synchronisme par impulsions successives, les impulsions
15 successives étant réputées présentées un rang r , $r-1$, ..., $r-p$ vis-à-vis d'une échelle de temps croissante t .

Par convention, l'impulsion courante est réputée avoir un rang r , l'impulsion précédant immédiatement cette impulsion courante le rang $r-1$ et les impulsions précédentes successives étant réputées avoir un rang antérieur
20 successivement jusqu'à $r-p$.

On comprend en outre que les ondes laser L_1 et L_2 sont superposées sur le même chemin optique, ce qui permet bien entendu d'obtenir des impulsions d'ondes laser modulées cohérentes et en phase dans des conditions qui seront explicitées ultérieurement dans la description.

25 Ainsi, on comprend que l'interaction entre la première respectivement la deuxième ondes laser L_1 , L_2 et en particulier la forme pulsée de celles-ci et le milieu d'interaction est limitée sensiblement à la durée de chaque impulsion successive S_r , S_{r-1} à S_{r-p} correspondant à un niveau haut d'intensité.

En conséquence, le signal de réponse engendré pendant une impulsion
30 courante, l'impulsion de rang r précédemment décrite, dépend de l'état atomique engendré pendant au moins une impulsion précédant cette impulsion courante, c'est-à-dire les impulsions précédentes de rang $r-1$ à $r-p$ et de l'évolution de cet état atomique pendant la durée de niveau bas d'intensité séparant les impulsions précitées.

Suite à la modulation par impulsions successives de l'intensité de la première et de la deuxième ondes laser L_1 , L_2 et bien entendu à l'illumination du milieu d'interaction par les impulsions d'ondes laser ainsi obtenues, le procédé objet de l'invention consiste de manière particulièrement remarquable à détecter à l'étape B et superposer par combinaison linéaire à l'étape C le signal de réponse engendré pendant l'impulsion courante, signal de réponse noté S_r de rang r correspondant à celui de l'impulsion d'illumination de même rang et au moins une impulsion précédant cette impulsion courante pour engendrer le signal d'horloge atomique compensé résultant, dont la largeur spectrale est minimisée.

Sur la figure 2a, l'opération de détection est représentée à l'étape B, le signal de réponse étant réputé consister en le signal de réponse S_r correspondant de rang r et les signaux de réponse successifs antérieurs S_{r-1} à S_{r-p} .

L'opération de superposition par combinaison linéaire est représentée à l'étape C de la figure 2a et illustrée par la formule de combinaison linéaire ci-après :

$$S_{HC} = \sum_{k=r-p}^{k=r} C_k \times S_k$$

Dans la formule précitée, on indique que S_{HC} représente le signal d'horloge atomique compensé résultant obtenu par la combinaison linéaire précitée C_k désignant un coefficient de pondération positif et/ou négatif appliqué à chaque impulsion de signal de réponse successive S_k .

Par convention, ainsi qu'il sera d'ailleurs décrit ultérieurement de manière plus détaillée relativement à une horloge atomique CPT conforme à l'objet de la présente invention, le coefficient de pondération C_k relatif au rang $k=r$ de l'impulsion courante peut être pris égal à 1, les coefficients de rang $k=r$, repéré par rapport à l'impulsion courante pour les impulsions antérieures, pouvant alors être pris égaux successivement à des valeurs différentes négatives par exemple afin de corriger et compenser le signal d'horloge atomique finalement obtenu. Le rang final de sommation par combinaison linéaire $k=r$ peut être déterminé expérimentalement ou pris comme paramètre.

La mise en œuvre du procédé objet de la présente invention n'est pas limitée à la modulation des deux ondes laser L_1 et L_2 et à l'interaction CPT.

Selon un mode de mise en œuvre particulièrement avantageux de ce dernier, il peut consister également, ainsi que représenté en figure 2b, à remplacer l'une des ondes laser d'excitation du milieu d'interaction, l'onde laser L_2 sur la figure

2b, par un signal radiofréquence MW dont la fréquence est sensiblement égale à la fréquence de la transition $e \rightarrow f$ des atomes du milieu d'interaction.

Ainsi que représenté à l'étape A de la figure 2b, le procédé objet de l'invention consiste, dans cette variante de réalisation, à moduler par impulsions
5 successives soit l'onde laser maintenue L_1 , soit cette onde laser maintenue L_1 et le signal radiofréquence MW.

En référence à la figure 2c, on indique que le processus de modulation par impulsions des ondes laser L_1 et L_2 ou signal radiofréquence MW est avantageusement effectué par train d'impulsions, la fréquence des impulsions de
10 modulation étant comprise entre 0,2 Hz et 10^4 Hz.

En référence à la figure 2c précitée et à l'axe temporel t , le niveau haut d'intensité de chaque impulsion pour un train d'impulsions donné a une durée h et le niveau bas d'intensité a une durée b .

Dans ces conditions, la plage de fréquences des impulsions d'ondes
15 laser modulées représentées au point 1 de la figure 2c et finalement de signal de réponse de rangs r , $r-1$, $r-p$ successifs est donné par la valeur $1/h+b$ pour les différentes valeurs de h et de b et le facteur de forme défini par la valeur $h/h+b$ est alors compris entre 10^{-6} et 10^{-1} .

On comprend bien entendu que les impulsions I d'ondes laser modulées
20 représentées au point 1) peuvent être obtenues par un signal électronique de commande présentant exactement les caractéristiques temporelles et/ou fréquentielles de celles représentées au point 1) de la figure 2c précitées.

En ce qui concerne le choix de l'intervalle de durée b séparant l'impulsion courante de rang r de l'impulsion précédant cette impulsion courante ou
25 toute impulsion antérieure de rang $r-1$ à $r-p$ dans un train d'impulsions de modulation, on indique que cette durée b est inférieure au temps de vie de la cohérence hyperfine existant entre les deux niveaux d'horloge.

En référence à la figure 1b, on rappelle que les deux niveaux d'horloge concernés sont les niveaux e et f qui déterminent la fréquence du signal d'horloge
30 atomique résultant et que ce temps de vie dépend essentiellement du milieu d'interaction considéré.

L'un des aspects remarquables du procédé objet de la présente invention est en particulier que ce dernier est susceptible d'être mis en œuvre à partir de milieux d'interaction constitués soit par des populations d'atomes

thermiques contenus dans une cellule soit au contraire par des populations constituées par des atomes froids et, en particulier, refroidis par laser.

Dans les deux cas le processus d'interrogation est avantageusement constitué par un mode d'interrogation de Ramsey avec au moins deux impulsions.

5 Pour ce qui concerne la technique de mise en œuvre des milieux d'interaction précités, on indique que les atomes thermiques sont délivrés sous forme de vapeur ou de jet. L'obtention des atomes refroidis par laser consiste à faire interagir les atomes thermiques avec des ondes laser correctement accordées par rapport à des transitions optiques des atomes. La pression de radiation induite
10 par les ondes laser permet de réduire rapidement l'énergie cinétique des atomes. On obtient ainsi des échantillons d'atomes refroidis de très faibles vitesses erratiques, de l'ordre de 1 cm/s, correspondant à une température de 10^{-6} K, très inférieure à celle des atomes thermiques, de l'ordre de quelques centaines de mètres par seconde, à la température de 300 K.

15 En ce qui concerne le mode de mise en œuvre d'une cellule de refroidissement laser des atomes permettant l'interaction d'un ou deux faisceaux laser modulés en impulsion, un tel mode de mise en œuvre, connu de l'état de la technique, ne sera pas décrit en détail. On pourra, dans ce but, se reporter utilement à la demande de brevet français publiée sous le numéro 2 730 845 au
20 nom du CNRS.

Dans le processus de refroidissement, on rappelle que l'énergie cinétique des atomes ou la variation d'énergie cinétique de ceux-ci est proportionnelle à l'abaissement de température de la valeur initiale 300 K à 10^{-6} K, le coefficient de proportionnalité dépendant de la constante de Boltzmann.

25 En ce qui concerne le processus de détection du signal de réponse et en particulier des impulsions de signal de réponse successives S_r à S_{r-p} , le processus de détection précité est avantageusement choisi parmi le groupe des processus de détection comprenant l'absorption optique, la fluorescence optique, la détection micro-onde en fonction de la fréquence du signal d'interrogation.

30 On comprend que le procédé objet de la présente invention peut être mis en œuvre dans de nombreuses situations compte tenu de la nature du milieu d'interaction choisi, le mode d'interrogation étant toutefois préférentiellement le mode d'interrogation de Ramsey avec au moins deux impulsions, ainsi que mentionné précédemment dans la description. Les processus de détection sont

alors les processus de détection par absorption optique, la fluorescence optique, la détection micro-onde en fonction de la fréquence du signal d'interrogation précité.

- 5 Le tableau ci-après établit le type d'horloge atomique susceptible de mettre en œuvre le procédé objet de la présente invention en indiquant la source atomique utilisée pour permettre la mise en œuvre du procédé, le processus ou mode d'interrogation ainsi que le processus de détection du signal d'horloge correspondant.

TYPE D'HORLOGE ATOMIQUE	SOURCE ATOMIQUE	MODE D'INTERROGATION		DETECTION DU SIGNAL D'HORLOGE
CPT (piégeage cohérent de population sur des atomes thermiques en cellule)	Vapeur thermique avec ou sans gaz tampon	Interrogation optique (transition d'horloge dans le domaine micro-onde)	Continu dans les dispositifs existants Interrogation pulsée dans ce type d'horloge	Absorption optique ou détection micro-onde
CPT (piégeage cohérent de population sur des atomes froids)	Vapeur + refroidissement laser	Interrogation optique (transition d'horloge dans le domaine micro-onde)	Interrogation de type pulsé.	Absorption optique ou détection micro-onde
Horloges à Rb en cellule à pompage optique	Vapeur thermique avec ou sans gaz tampon	Radiofréquence et optique simultanés	(continu dans les dispositifs existants) Interrogation pulsée dans ce type d'horloge	Absorption optique

- 10 En référence au tableau précité on indique que les horloges atomiques de type CPT permettent la mise en œuvre du procédé objet de l'invention selon la figure 2a et que les horloges atomiques de type à rubidium en cellule à pompage optique permettent la mise en œuvre du procédé objet de l'invention selon la figure 2b.

- 15 Une description plus détaillée d'une horloge atomique à interrogation pulsée conforme à l'objet de la présente invention sera maintenant donnée en liaison avec la figure 3 et les figures suivantes.

D'une manière générale, on indique que l'architecture de l'horloge atomique à interrogation pulsée conforme à l'objet de la présente invention correspond à celle qui est représentée en figure 3.

- 20 En particulier, une telle horloge comprend, dans une section optique SO, un module optique d'interrogation 1 permettant d'engendrer un premier et un deuxième faisceau laser cohérents en phase L_1 , L_2 . Ainsi que cité précédemment,

chacun des faisceaux laser précités est sensiblement en résonance avec une transition optique des atomes d'un milieu d'interaction.

L'horloge atomique à interrogation pulsée comporte en outre une cellule d'interaction 3 comportant le milieu d'interaction précité.

5 Par notion de cellule d'interaction 3, on indique que la cellule d'interaction peut être constituée de manière classique par une enveloppe transparente au faisceau laser L_1 , L_2 et bien entendu, par tout dispositif générateur du milieu d'interaction, c'est-à-dire d'atomes thermiques et/ou refroidis par laser.

Le module d'interrogation 1 engendre les deux faisceaux laser L_1 et L_2
10 dont la différence de fréquence est égale à la fréquence de résonance, la fréquence micro-onde à 9,2 GHz pour le césium et 6,8 GHz pour le rubidium par exemple.

Dans le cas du césium, les fréquences des diodes laser sont au voisinage de 852 nm pour la raie D_2 et 894 nm pour la raie D_1 .

Les raies laser précitées peuvent être utilisées pour une interaction CPT
15 telle que décrite précédemment dans la description.

Grâce à leur plus grand écart hyperfin dans l'état excité, les transitions de la raie D_1 apparaissent plus intéressantes car elles permettent de réduire, d'une part, les pertes d'atomes à cause des fuites sur des transitions adjacentes, et, d'autre part, les déplacements lumineux.

20 Il est en outre possible de mettre en œuvre des atomes de rubidium pour lesquels la raie D_2 est à 780 nm et la raie D_1 est à 795 nm, les fréquences correspondantes f_2 et f_1 étant accessibles facilement avec des diodes laser du commerce.

Différents processus peuvent être mis en œuvre pour engendrer deux
25 radiations, c'est-à-dire les faisceaux laser L_1 et L_2 , lesquels induisent le piégeage cohérent de la population d'atomes du milieu d'interaction. La différence de fréquence entre les faisceaux laser L_1 et L_2 est égale à la fréquence d'horloge, c'est-à-dire la fréquence du signal d'horloge atomique. La différence de phase entre la phase des faisceaux laser L_1 et L_2 doit présenter des fluctuations aussi faibles
30 que possibles afin d'éviter toute destruction du phénomène d'interférence. La puissance d'émission requise pour les faisceaux laser est de l'ordre du milliwatt.

Dans un mode de mise en œuvre spécifique, on indique que l'optique d'interrogation peut être réalisée à partir d'une source laser unique à laquelle on applique une modulation de fréquence à plusieurs GHz de type modulation à

bandes latérales, la distance entre les bandes latérales correspondant à la fréquence d'horloge. On dispose ainsi des deux raies précédemment mentionnées avec une cohérence de phase aussi bonne que celle du signal de modulation.

Les deux raies ou faisceaux laser L_1 et L_2 sont alors superposés
5 physiquement de manière classique afin que ces derniers suivent le même chemin optique et soient soumis aux mêmes déphasages successifs jusqu'à leur application sur le milieu d'interaction.

En ce qui concerne la mise en œuvre du procédé objet de l'invention selon la variante représentée en figure 2b, on indique que le signal radiofréquence
10 MW, modulé ou non, en synchronisme avec l'onde laser maintenue L_1 modulée par impulsions, est appliqué de manière classique à la cellule d'interaction 3.

En ce qui concerne la cellule d'interaction 3, on indique que celle-ci peut être mise en œuvre à partir d'une enceinte en pyrex ou en quartz.

En outre, des gaz tampon peuvent être ajoutés afin d'éliminer
15 l'élargissement des raies par effet Doppler en se plaçant dans le régime de Lamb-Dicke. L'environnement magnétique et thermique est contrôlé de manière stricte pour éviter toute variation de déplacement de fréquence qui affecterait l'exactitude et la stabilité à long terme de l'horloge atomique ainsi constituée.

L'horloge atomique à interrogation pulsée comporte, dans une section
20 de détection SD, également un module 4 de détection du signal de réponse, le signal de réponse étant défini comme le signal délivré par le milieu d'interaction de la cellule 3 après illumination du milieu d'interaction par les faisceaux laser L_1 et L_2 . Le module de détection 4 est bien entendu adapté à la longueur d'onde et à l'amplitude du signal de réponse pour délivrer une version électronique du signal de
25 réponse.

De manière plus spécifique, le module 4 de détection du signal de réponse peut être constitué par des modules mettant en œuvre les processus de détection tels que décrits au tableau précédemment cité.

Selon un aspect particulièrement remarquable de l'horloge atomique à
30 interrogation pulsée objet de la présente invention, celle-ci comporte un module 2 de modulation par impulsions de l'intensité du premier et du deuxième faisceaux laser L_1 et L_2 entre un niveau haut et un niveau bas d'intensité.

Bien entendu, ainsi que représenté sur la figure 3, le module 2 de modulation est placé dans la section optique SO sur le trajet des premier et

deuxième faisceaux laser en amont de la cellule d'interaction 3 pour engendrer en synchronisme un premier et un deuxième faisceaux laser pulsés permettant d'illuminer le milieu d'interaction contenu dans la cellule 3, selon la figure 2a, ou l'onde laser maintenue L_1 modulée et le signal radiofréquence MW modulé ou non, selon la figure 2b.

Du fait de l'illumination du milieu d'interaction précité par le premier et le deuxième faisceaux laser ou signal radiofréquence pulsés, l'interaction entre les faisceaux laser précités et le milieu d'interaction est sensiblement limitée à la durée de chaque impulsion successive correspondant à un niveau haut d'intensité.

En conséquence, le signal de réponse engendré pendant une impulsion courante de rang r par exemple dépend de l'état atomique engendré pendant au moins une impulsion précédant cette impulsion courante, c'est-à-dire des impulsions de rang $r-1$ à $r-p$ précédemment mentionnés dans la description, et, bien entendu, de l'évolution de cet état atomique pendant la durée de niveau bas d'énergie d'intensité séparant ces impulsions.

En outre, ainsi que représenté sur la figure 3, le module de détection du signal de réponse 4 peut être suivi d'un module 5 de traitement, le module 5 de traitement recevant la version électronique du signal de réponse et effectuant un traitement de sommation par combinaison linéaire du signal de réponse engendré pendant l'impulsion courante et pendant au moins une impulsion précédant cette impulsion courante, c'est-à-dire pendant les impulsions antérieures successives. Le module 5 de traitement par combinaison linéaire permet ainsi d'engendrer un signal d'horloge atomique compensé résultant dont la largeur spectrale est minimisée et de construire un signal de correction S_c permettant de piloter la fréquence d'un oscillateur local 6.

Sur la figure 3, le module 5 de traitement délivre en fait le signal de correction S_c au module 6 implanté dans une section analogique SA et constitué par exemple par un oscillateur local LO et un synthétiseur S délivrant, d'une part, un signal périodique asservi en fréquence S_u , pour utilisation comme référence de fréquence pour un utilisateur externe, et, d'autre part, un signal de commande S_{co} du module optique d'interrogation 1.

Ce signal de commande S_{co} peut par exemple consister en une référence de fréquence permettant d'effectuer la commande du processus de modulation en bandes latérales précédemment mentionnées dans la description

pour obtenir les deux faisceaux laser L_1 et L_2 , à partir d'une source laser unique par exemple. On indique que le signal de commande S_{CO} précité peut également permettre d'assurer une commande d'asservissement de la longueur d'ondes et/ou de la fréquence de la source laser unique et/ou des faisceaux laser L_1 et L_2 à la
5 valeur choisie, ainsi que la génération du signal radiofréquence MW.

Le mode de mise en œuvre de ce processus de commande d'asservissement ne sera pas décrit en détails car il correspond à un mode de mise en œuvre connu de l'état de la technique.

Bien entendu, ainsi que représenté en outre en figure 3, l'horloge
10 atomique à interrogation pulsée, objet de la présente invention, est munie d'une unité de commande 7 qui peut être constituée par un micro-ordinateur relié par une liaison par bus à l'ensemble des modules tels que le module de modulation par impulsion 2, le module 4 de détection du signal de réponse, et, bien entendu le module 5 de traitement et le module 6 jouant le rôle d'oscillateur local LO et/ou de
15 synthétiseur S.

On comprend en particulier que l'unité de commande 7 permet d'assurer la synchronisation de l'ensemble des modules précités ainsi que la commande des trains d'impulsions de modulation engendrés, à partir d'un signal de commande électronique, par exemple, élaboré par l'unité de commande 7, pour commander le
20 module 2 de modulation.

En ce qui concerne le module 2 de modulation par impulsions de l'intensité du premier et du deuxième faisceaux laser L_1 , L_2 on indique que ce dernier peut être constitué par un modulateur acousto-optique, un modulateur électro-optique ou finalement par tout autre composant de modulation de l'intensité
25 d'un signal lumineux dont le temps de réponse est suffisamment bref pour assurer une telle modulation. Un modulateur radiofréquence est prévu pour assurer, le cas échéant, la modulation du signal radiofréquence MW.

D'une manière plus spécifique, on indique que le niveau bas d'intensité correspond à une intensité sensiblement nulle de chacun des faisceaux laser ou du
30 signal radiofréquence, ceux-ci étant totalement absorbés par le module 2 de modulation précédemment mentionné.

Une description plus détaillée du module de traitement 5 de sommation par combinaison linéaire du signal de réponse sera maintenant donnée en liaison avec la figure 4a et la figure 4b.

D'une manière générale, on comprend que le module 5 de traitement précité reçoit le signal de réponse sous sa forme de signal électronique délivré par le module de détection 4.

Pour assurer le traitement des impulsions successives S_r reçues, le module 5 de traitement peut, ainsi que représenté en figure 4a, comporter avantageusement un module d'échantillonnage 50 du signal de réponse engendré pendant l'interaction de l'impulsion courante et d'au moins une impulsion précédant cette impulsion courante, le module 50 d'échantillonnage précité étant déclenché en synchronisme avec la commande du module 2 de modulation des faisceaux laser L_1 et L_2 .

Le module 50 d'échantillonnage est préférentiellement suivi d'un module 51 de mémorisation des valeurs échantillonnées du signal de réponse engendré pendant l'interaction de chacune des impulsions précitées.

Enfin, le module 51 de mémorisation peut être suivi d'un module 52 permettant d'assurer le calcul d'une combinaison linéaire des valeurs échantillonnées mémorisées permettant d'engendrer le signal d'horloge atomique compensé S_{HC} précédemment mentionné dans la description. A partir de ce dernier un module 53 formé par exemple par un intégrateur permet de délivrer le signal de correction S_c au module 6 constitué par l'oscillateur local LO et le synthétiseur S, par exemple.

Le synthétiseur S permet d'engendrer un signal micro-ondes dont la fréquence est voisine de la fréquence de résonance de la transition $e \rightarrow f$.

Enfin, l'unité de commande 7 peut avantageusement être constituée par un poste de travail ou un micro-ordinateur comportant un programme de commande de l'ensemble, de façon à assurer la synchronisation du module 2 de modulation, du module 4 de détection du signal de réponse, du module 5 de traitement précédemment décrit en liaison avec la figure 4a et, bien entendu, du module 6 constitué par l'oscillateur local et le synthétiseur précédemment décrits.

En particulier, dans un mode de réalisation non limitatif, on indique que l'unité de commande 7 peut être avantageusement programmée pour assurer, grâce à un logiciel de commande, une lecture des valeurs échantillonnées mémorisées dans le module de mémorisation 51 à des instants déterminés.

En particulier, dans ces conditions, l'unité de commande 7 peut alors comporter un programme de tri des valeurs échantillonnées mémorisées pour

déterminer pour chacune des impulsions S_r à S_{r-p} les valeurs maximales et/ou minimales de ces valeurs échantillonnées pour chacune des impulsions successives précitées.

5 Ainsi, dans un mode de mise en œuvre non limitatif de l'horloge atomique objet de la présente invention, on indique qu'un processus de traitement peut consister avantageusement, ainsi que représenté au point 2 de la figure 4b, pour l'impulsion courante S_r de rang r , à déterminer la valeur échantillonnée de cette impulsion qui présente la valeur maximale, cette valeur maximale étant notée M_r puis pour les impulsions successives de rang antérieur $r-1$ à $r-p$, à déterminer
10 dans chacune de celles-ci le minimum des valeurs échantillonnées correspondantes dans ses impulsions successives.

Ainsi, les minima correspondants sont notés m_{r-1} pour l'impulsion antérieure précédant immédiatement l'impulsion courante, cette impulsion antérieure étant de rang $r-1$, puis les valeurs successives m_{r-2} à m_{r-p} pour des
15 impulsions antérieures précédentes de rang $r-2$ jusqu'à $r-p$.

Selon un mode de mise en œuvre non limitatif préférentiel de l'horloge atomique à interrogation pulsée objet de la présente invention, on indique que la combinaison linéaire des valeurs échantillonnées peut alors consister à additionner le maximum des valeurs échantillonnées pour l'impulsion courante de rang r et de
20 retrancher les valeurs minimales successives des impulsions antérieures de rang $r-1$ à $r-p$, ainsi que représenté sur la figure 4b, ou une valeur moyenne de celles-ci.

On comprend que le programme de tri peut alors effectuer le tri par rapport à l'origine de chacune des impulsions, ces origines étant notées successivement o_r , o_{r-1} , o_{r-p} .

25 Ainsi, grâce à la mise en œuvre du processus de traitement réalisé par le module de traitement 5 représenté en figure 3, 4a et 4b, on comprend, en particulier, que le maximum M_r de l'impulsion courante de rang r permet d'obtenir la valeur maximale d'amplitude pour le signal de réponse détectée alors que la soustraction des valeurs échantillonnées successives, représentatives des minima
30 locaux pour ces dernières, permet au contraire de retrancher une valeur échantillonnée représentative des dérives et perturbations introduites par le milieu d'interaction contenu dans la cellule 3, pour obtenir un signal d'horloge atomique compensé dont la largeur spectrale est ainsi minimalisée et dont le contraste peut

être sensiblement amélioré, grâce à la suppression des composantes continues ou lentement variables représentatives de la dérive de l'ensemble du système.

Bien entendu, et dans un but d'augmenter la rapidité de traitement et l'obtention de réponse en temps réel pour la partie numérique du module 5 de traitement, les modules 51, 52 et 53 peuvent être remplacés par un processeur de signal dédié programmé à cet effet.

Des justificatifs théoriques et expérimentaux relatifs aux performances obtenues grâce à la mise en œuvre du procédé et d'une horloge atomique à interrogation pulsée conformes à l'objet de la présente invention seront maintenant donnés ci-après en liaison avec la figure 4c.

Lorsqu'on considère une horloge atomique du type horloge CPT à atomes thermiques dans laquelle le milieu d'interaction est exempt de gaz tampon, la largeur de la raie d'oscillation obtenue pour le signal d'horloge, largeur à 3dB par rapport à l'amplitude maximale au sommet de l'oscillation, est de quelques kHz pour une fréquence centrale de l'ordre de quelques GHz. Une telle largeur de raie est trop importante pour être compatible avec une utilisation de telles horloges atomiques comme horloge de référence. Ceci peut être expliqué en raison du fait qu'en l'absence de gaz tampon, les atomes du milieu d'interaction sont soumis à un déplacement erratique rapide trop important qui élargit le phénomène de résonance par effet Doppler et limitation du temps de transit et, finalement, la qualité du résonateur radio-électrique ainsi constitué.

Lorsque, au contraire un gaz tampon est utilisé dans ce même type d'horloge, le régime de Lamb-Dicke est atteint et la largeur de raie du signal d'horloge atomique est principalement limitée par la relaxation de la cohérence dans l'état fondamental et l'élargissement dû à la saturation laser. Des largeurs de raie de l'ordre de 100 Hz ont jusqu'ici été obtenues. Des stabilités à court terme de la fréquence du signal utilisateur S_u de l'ordre de 5 à 15 10^{-12} après 1 seconde d'intégration ont été mesurées avec une détection optique ou micro-onde du signal d'horloge précité. La stabilité à long terme est essentiellement limitée par les fluctuations de fréquence induites par les collisions avec le gaz tampon. Le déplacement de fréquence correspondant vis-à-vis du désaccord Raman est directement relié à la pression de gaz tampon qui est elle-même fonction de la température du milieu d'interaction et donc de la cellule.

La largeur de raie Δf_{CPT} du signal de résonance et du signal d'horloge dans une horloge de ce type à une valeur donnée par la relation (1).

$$\Delta f_{\text{CPT}} = \Delta f_{\text{TT}} + \Delta f_{\text{collision}} + \Delta f_{\text{Doppler}} + \Delta f_{\text{saturation}} \quad (1)$$

Dans cette relation :

- 5 - Δf_{TT} décrit l'élargissement dû au temps de transit limité des atomes du milieu d'interaction à travers les faisceaux laser.

Pour une interrogation continue, Δf_{TT} varie comme $1/T$ où T désigne le temps d'interaction entre un atome et les ondes laser.

- 10 Pour une interrogation pulsée conformément à la mise en œuvre du procédé et de l'horloge à interrogation pulsée objet de la présente invention, Δf_{TT} varie comme $1/2b$ où b désigne le temps mort entre deux impulsions consécutives d'un train d'impulsions ;

- $\Delta f_{\text{collision}}$ est l'élargissement de la raie résultant de l'amortissement de la cohérence dû aux collisions entre atomes ;

- 15 - $\Delta f_{\text{Doppler}}$ est l'élargissement par effet Doppler du premier ordre ;

- $\Delta f_{\text{saturation}}$ est l'élargissement par saturation lié aux intensités réelles des faisceaux laser illuminant le milieu d'interaction.

Pour une horloge atomique CPT dont le milieu d'interaction est constitué par des atomes thermiques sous forme d'une vapeur :

- 20 - $\Delta f_{\text{Doppler}}$ et Δf_{TT} sont négligeables en raison de la présence du gaz tampon ;

- $\Delta f_{\text{saturation}}$ peut être réduit en ajustant la puissance laser mais au détriment du rapport signal à bruit, ainsi que mentionné précédemment dans l'introduction à la description pour les dispositifs de l'art antérieur à interrogation continue ;

- 25 - $\Delta f_{\text{collision}}$ est la source prédominante de l'élargissement de la raie constitutive du signal d'horloge atomique obtenu.

- 30 La figure 4c illustre le mode de mise en œuvre du procédé objet de la présente invention grâce à une horloge atomique à interrogation pulsée dans laquelle le milieu d'interaction est constitué par des atomes thermiques de césium en présence d'un gaz tampon, formé par de l'azote. Elle représente l'amplitude du

signal d'horloge compensé S_{HC} en fonction du désaccord de la différence des fréquences Δf_{12} des deux ondes laser.

L'axe des abscisses de la figure 4c est gradué en kHz vis-à-vis d'une valeur 0 origine du désaccord Raman. La distance δ représente le désaccord
5 introduit en raison de la présence du gaz tampon. Ce biais de fréquence peut être réduit en utilisant deux gaz tampon, azote et argon par exemple, induisant des déplacements collisionnels de signe opposé.

En référence à la figure précitée, on constate que pour l'amplitude maximale mesurée en millivolts sur l'axe des ordonnées, la largeur des oscillations
10 reste aussi faible que 25 Hz grâce à la mise en œuvre du traitement et, bien entendu, de la modulation par impulsions des faisceaux laser L_1 et L_2 utilisés. Lorsque, au contraire et selon un aspect particulièrement remarquable du procédé et de l'horloge atomique à interrogation pulsée conformes à l'objet de la présente invention, le milieu d'interaction est constitué par des atomes refroidis par laser, la
15 vitesse des atomes est réduite dans les conditions précédemment mentionnées dans la description, c'est-à-dire à des vitesses erratiques environ 1000 fois plus faibles que celles des atomes thermiques.

Dans ces conditions, il est alors possible d'obtenir des longs temps d'interaction entre les faisceaux laser d'illumination et le milieu d'interaction sans
20 l'utilisation d'un gaz tampon, ce qui permet d'annuler ainsi le déplacement δ précédemment mentionné en liaison avec la figure 4c de résonance et l'élargissement de fréquences dû aux collisions.

Ainsi, pour une horloge à interrogation pulsée, horloge atomique CPT à atomes froids, les paramètres précités sont alors traités de la façon ci-après :

25 - $\Delta f_{Doppler}$ et Δf_{TT} sont négligeables grâce aux faibles vitesses des atomes froids, refroidis par laser ;

- $\Delta f_{collision}$ est également négligeable lorsque la densité d'atomes froids est suffisamment faible.

A ce titre, l'atome de rubidium apparaît plus intéressant que l'atome de
30 césium car le déplacement collisionnel est au moins 50 fois plus faible.

Ainsi, on constate que c'est l'élargissement par saturation $\Delta f_{saturation}$ qui limite la largeur de raie d'une horloge atomique dont le milieu d'interaction est constitué par des atomes refroidis par laser.

Lorsque, en outre, le processus d'interrogation est effectué conformément au procédé objet de la présente invention, c'est-à-dire par interrogation pulsée, il est alors possible de réduire de manière très significative la contribution de l'effet de saturation tout en continuant de détecter les signaux

5 d'intensité suffisante, c'est-à-dire avec un rapport signal à bruit satisfaisant.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de génération d'un signal d'horloge atomique à piégeage cohérent de population, à partir d'une première et d'une deuxième onde laser cohérentes en phase, chacune sensiblement en résonance avec une transition
5 optique des atomes d'un milieu d'interaction, la superposition cohérente des états atomiques correspondant au piégeage cohérent de population d'atomes engendrant un signal de réponse présentant une amplitude extrême à la résonance et représentative du signal d'horloge atomique correspondant à la variation d'amplitude du signal détecté en fonction de la valeur de la différence de
10 fréquence de la première et la deuxième onde laser cohérentes en phase, caractérisé en ce que celui-ci consiste au moins à :

- moduler en synchronisme par impulsions successives l'intensité de la première et la deuxième onde laser, selon un facteur de forme déterminé entre un niveau haut et un niveau bas d'intensité, l'interaction entre la première
15 respectivement la deuxième onde laser et le milieu d'interaction étant limitée sensiblement à la durée de chaque impulsion successive correspondant à un niveau haut d'intensité, ledit signal de réponse engendré pendant une impulsion courante dépendant de l'état atomique engendré pendant au moins une impulsion précédant cette impulsion courante et de l'évolution de cet état atomique pendant la
20 durée de niveau bas d'intensité séparant lesdites impulsions ;

- détecter et superposer par combinaison linéaire ledit signal de réponse engendré pendant ladite impulsion courante et au moins une impulsion précédant cette impulsion courante, pour engendrer un signal d'horloge atomique compensé résultant, dont la largeur spectrale est minimisée.

25 2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la modulation par impulsions est effectuée par trains d'impulsions, la fréquence des impulsions de modulation étant comprise entre 0,2 Hz et 10^4 Hz.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que les impulsions de modulation présentent un facteur de forme compris entre 10^{-6} et 10^{-1} .

30 4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que la durée de niveau bas d'intensité séparant ladite impulsion courante de ladite impulsion précédant cette impulsion courante est inférieure au temps de vie de la cohérence hyperfine existant entre deux niveaux d'horloge.

5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que ledit milieu d'interaction est formé par une pluralité d'atomes thermiques ou refroidis par laser.

5 l'étape consistant à détecter ledit signal d'horloge est choisie comme l'un des processus de détection parmi le groupe des processus de détection comprenant l'absorption optique, la fluorescence optique, la détection micro-onde, en fonction de la différence de fréquence de la première et de la deuxième onde laser cohérentes en phase.

10 7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que celui-ci consiste à remplacer l'une des ondes laser d'excitation du milieu d'interaction par un signal radiofréquence dont la fréquence est sensiblement égale à la fréquence de transition des atomes du milieu d'interaction, ledit procédé consistant à moduler par impulsions successives soit l'onde laser maintenue, soit
15 l'onde laser maintenue et le signal radiofréquence.

8. Horloge atomique à interrogation pulsée, comportant au moins :

- un moyen optique d'interrogation permettant d'engendrer un premier et un deuxième faisceau laser cohérents en phase, chacun sensiblement en résonance avec une transition optique des atomes d'un milieu d'interaction ;

20 - une cellule d'interaction comportant ledit milieu d'interaction, illuminé en fonctionnement par le premier et le deuxième faisceau laser cohérents en phase, pour engendrer un signal de réponse présentant une amplitude extrême à la résonance et correspondant à la variation d'amplitude du signal détecté en fonction de la différence de fréquence du premier et du deuxième faisceau laser cohérents en phase ;
25

- des moyens de détection dudit signal de réponse, lesdits moyens de détection étant adaptés à la longueur d'onde et à l'amplitude du signal de réponse, caractérisé en ce que ladite horloge atomique comporte en outre :

- des moyens de modulation par impulsions de l'intensité du premier et
30 du deuxième faisceau laser entre un niveau haut et un niveau bas d'intensité, lesdits moyens de modulation étant placés sur le trajet desdits premier et deuxième faisceau laser en amont de ladite cellule d'interaction pour engendrer en synchronisme un premier et un deuxième faisceau laser pulsé, l'interaction entre le premier respectivement le deuxième faisceau laser et le milieu d'interaction étant

sensiblement limitée à la durée de chaque impulsion successive correspondant à un niveau haut d'intensité, ledit signal de réponse engendré pendant une impulsion courante dépendant de l'état atomique engendré pendant au moins une impulsion précédant cette impulsion courante et de l'évolution de cet état atomique pendant la

5 durée de niveau bas d'énergie d'intensité séparant lesdites impulsions, et en ce que

- lesdits moyens de détection comprennent en outre des moyens sommateurs par combinaison linéaire du signal de réponse engendré pendant cette impulsion courante et du signal de réponse engendré pendant au moins une impulsion précédant cette impulsion courante, lesdits moyens sommateurs par

10 combinaison linéaire permettant d'engendrer un signal d'horloge atomique compensé résultant, dont la largeur spectrale est minimisée.

9. Horloge atomique selon la revendication 8, caractérisée en ce que lesdits moyens de modulation par impulsion de l'intensité du premier et du deuxième faisceau laser entre un niveau haut d'intensité et un niveau bas

15 comportent au moins un modulateur acousto-optique.

10. Horloge atomique selon l'une des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce que lesdits moyens de détection comprennent en outre :

- des moyens d'échantillonnage du signal de réponse engendré pendant l'interaction de l'impulsion courante et d'au moins une impulsion précédant cette

20 impulsion courante ;

- des moyens de mémorisation des valeurs échantillonnées du signal de réponse engendré pendant l'interaction de chacune desdites impulsions.

11. Horloge atomique selon la revendication 10, caractérisé en ce que lesdits moyens de détection comprennent en outre :

- des moyens de lecture des valeurs échantillonnées à des instants déterminés mémorisés dans lesdits moyens de mémorisation ;

25

- des moyens de calcul d'une combinaison linéaire desdites valeurs échantillonnées mémorisées permettant d'engendrer ledit signal d'horloge atomique compensé.

12. Horloge atomique selon l'une des revendications 8 à 11, caractérisé en ce que l'un des faisceaux laser est remplacé par un signal radiofréquence, le faisceau laser maintenu ou le faisceau laser maintenu et le signal radiofréquence étant soumis à une modulation par train d'impulsions successives.

30

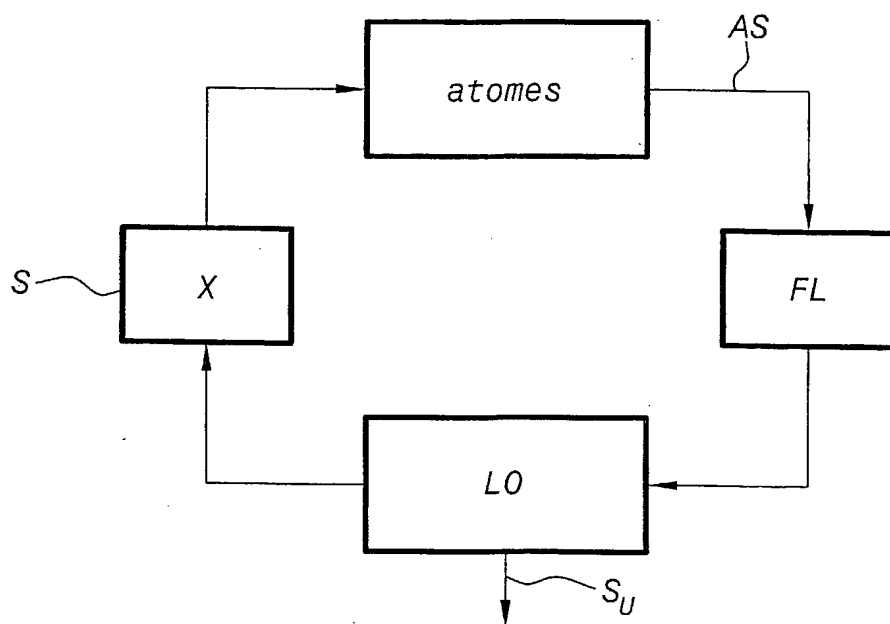


FIG.1a
(art antérieur)

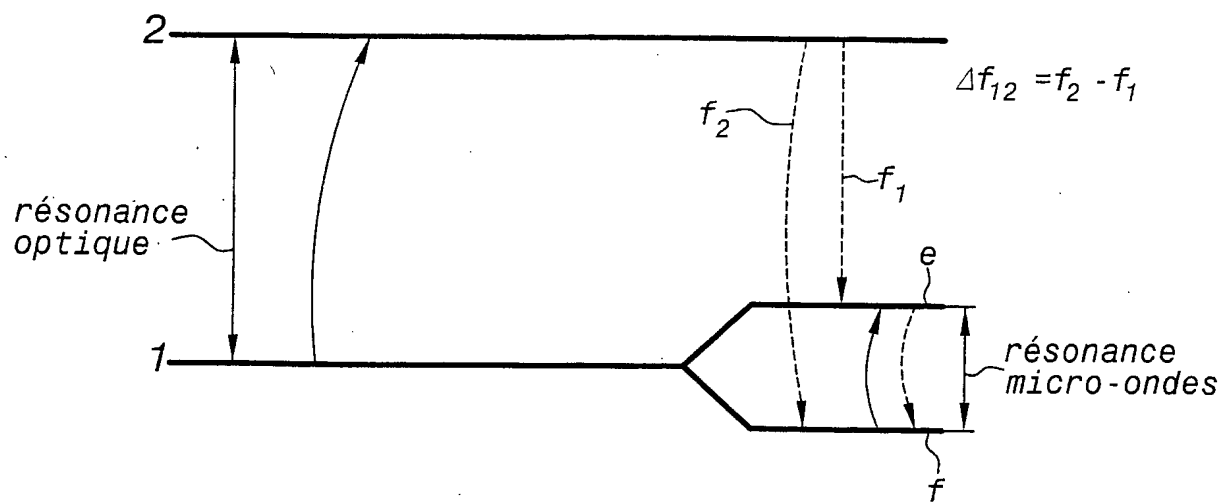
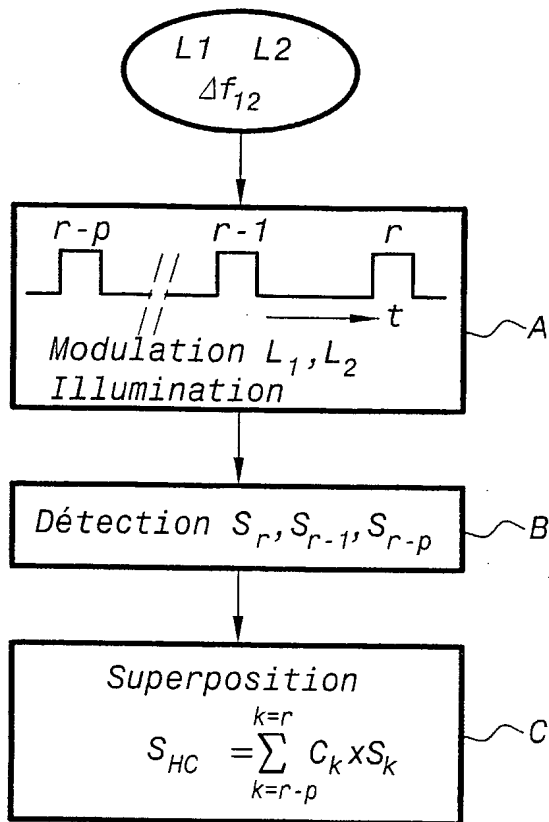
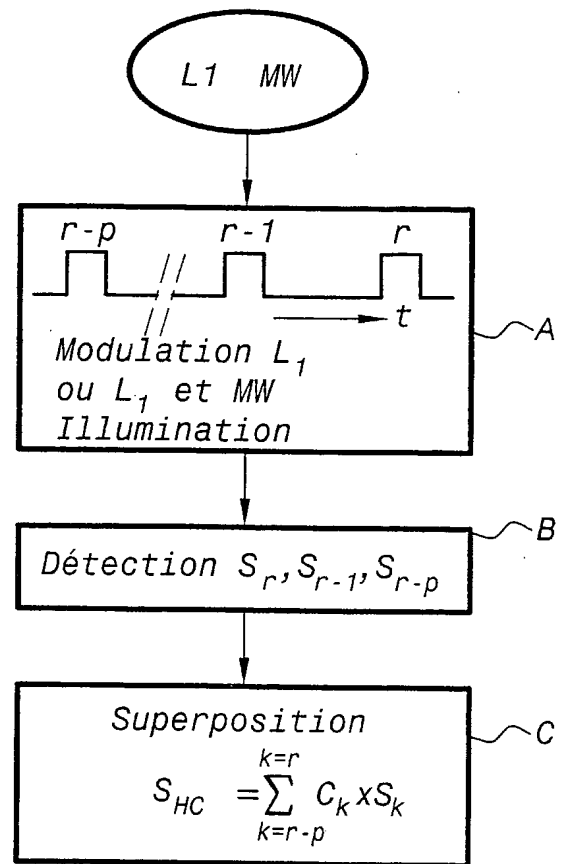
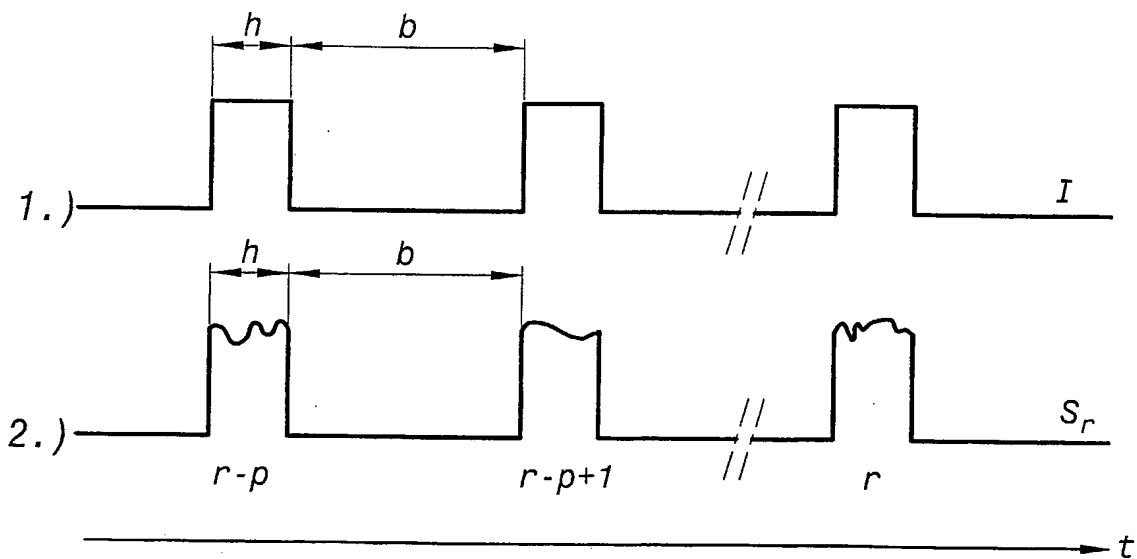
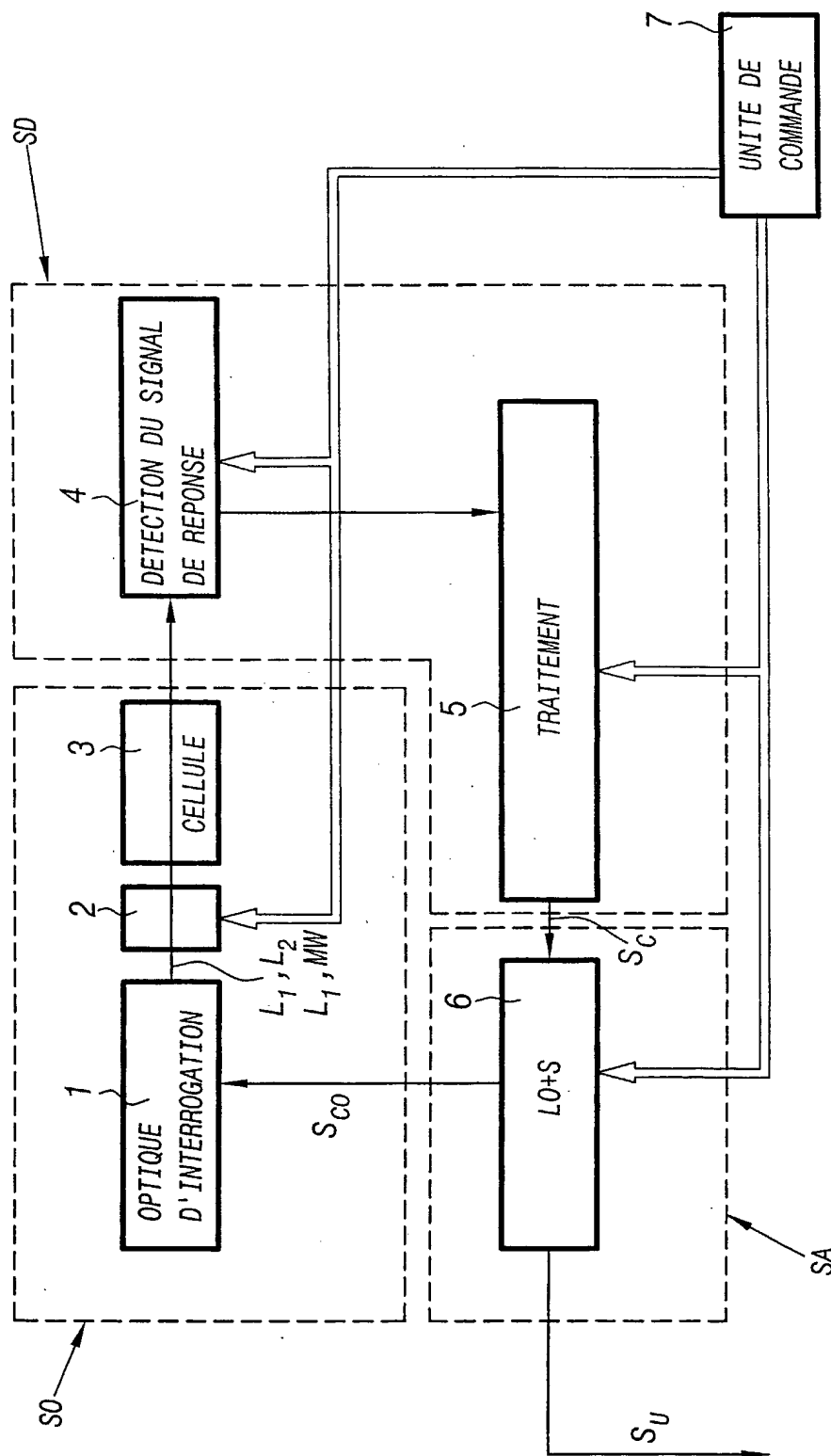
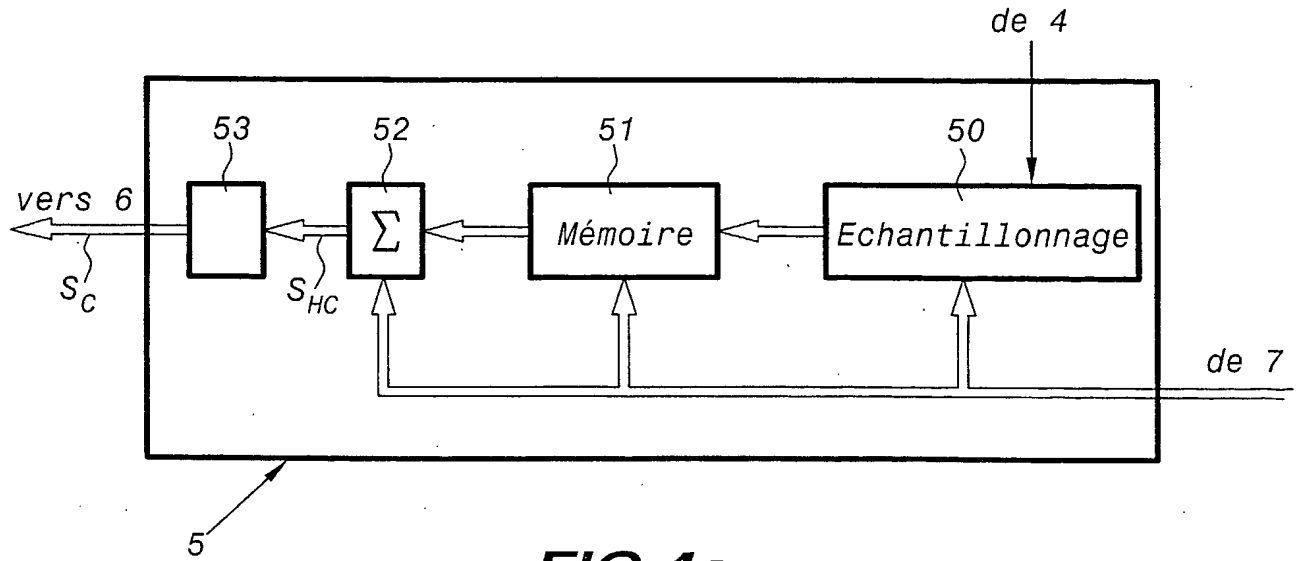
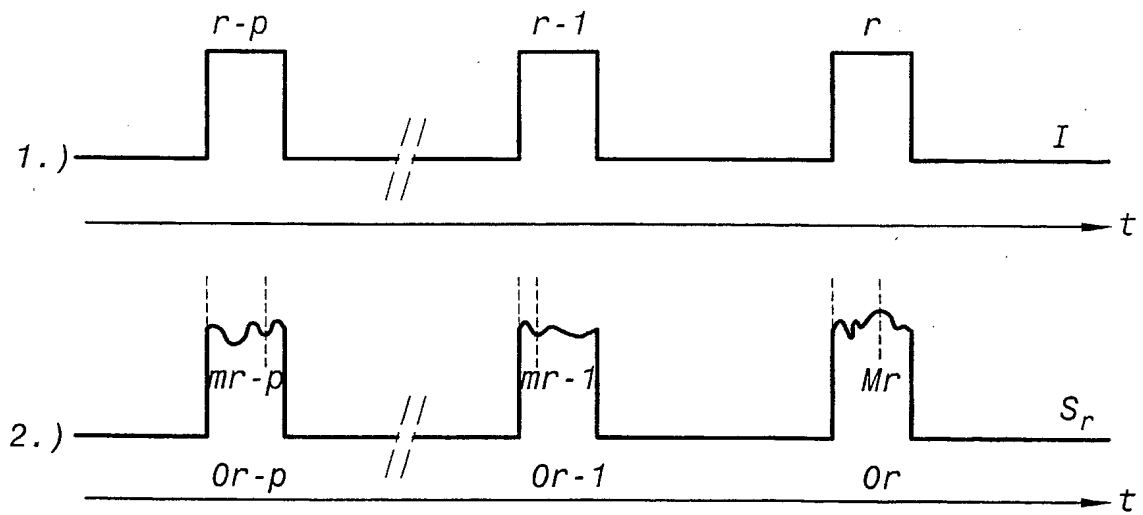
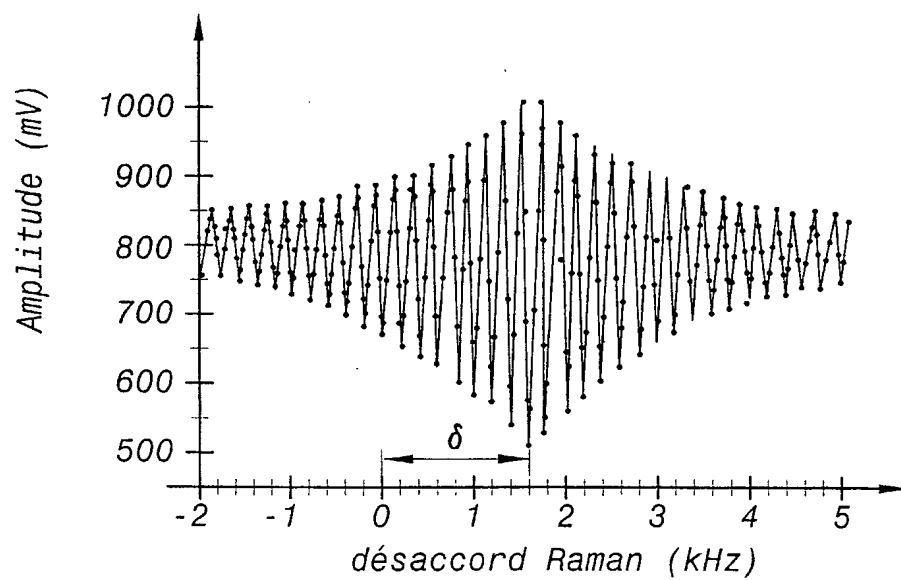


FIG.1b
(art antérieur)

**FIG. 2a****FIG. 2b****FIG. 2c**

**FIG. 3**

**FIG.4a****FIG.4b**

**FIG.4c**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR2005/000754

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 IPC 7 G04F5/14 H03L7/26

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G04F H03L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 2 581 261 A (CEPE) 31 October 1986 (1986-10-31) claims 1-3	1-12
A	GB 1 068 272 A (STANDARD TELEPHONES CABLES LTD) 10 May 1967 (1967-05-10) figure 1	1-12
	----- -/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

25 August 2005

Date of mailing of the international search report

05/09/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Pirozzi, G

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR2005/000754

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>ZANON T ET AL: "Coherent population trapping with cold atoms" PROCEEDINGS OF THE 2003 IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM& PDA EXHIBITION JOINTLY WITH THE 17TH. EUROPEAN FREQUENCY AND TIME FORUM. TAMPA, FL, MAY 4 - 8, 2003, IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM, NEW YORK, NY : IEEE, US, 4 May 2003 (2003-05-04), pages 49-54, XP010688802 ISBN: 0-7803-7688-9 the whole document</p>	1-12
A	<p>----- VANIER J ET AL: "Atomic clocks based on coherent population trapping: basic theoretical models and frequency stability" PROCEEDINGS OF THE 2003 IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM& PDA EXHIBITION JOINTLY WITH THE 17TH. EUROPEAN FREQUENCY AND TIME FORUM. TAMPA, FL, MAY 4 - 8, 2003, IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM, NEW YORK, NY : IEEE, US, 4 May 2003 (2003-05-04), pages 2-15, XP010688798 ISBN: 0-7803-7688-9 the whole document</p> <p>-----</p>	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR2005/000754

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
FR 2581261	A	31-10-1986	FR 2581261 A1	31-10-1986
			CA 1266099 A1	20-02-1990
			JP 61253876 A	11-11-1986
			US 4684900 A	04-08-1987
<hr/>				
GB 1068272	A	10-05-1967	US 3234483 A	08-02-1966
			FR 88181 E	03-06-1966
<hr/>				

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale No

PCT/FR2005/000754

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 G04F5/14 H03L7/26

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G04F H03L

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	FR 2 581 261 A (CEPE) 31 octobre 1986 (1986-10-31) revendications 1-3	1-12
A	GB 1 068 272 A (STANDARD TELEPHONES CABLES LTD) 10 mai 1967 (1967-05-10) figure 1	1-12
	----- -/--	

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

° Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

25 août 2005

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

05/09/2005

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Pirozzi, G

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>ZANON T ET AL: "Coherent population trapping with cold atoms" PROCEEDINGS OF THE 2003 IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM& PDA EXHIBITION JOINTLY WITH THE 17TH. EUROPEAN FREQUENCY AND TIME FORUM. TAMPA, FL, MAY 4 - 8, 2003, IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM, NEW YORK, NY : IEEE, US, 4 mai 2003 (2003-05-04), pages 49-54, XP010688802 ISBN: 0-7803-7688-9 le document en entier</p>	1-12
A	<p>VANIER J ET AL: "Atomic clocks based on coherent population trapping: basic theoretical models and frequency stability" PROCEEDINGS OF THE 2003 IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM& PDA EXHIBITION JOINTLY WITH THE 17TH. EUROPEAN FREQUENCY AND TIME FORUM. TAMPA, FL, MAY 4 - 8, 2003, IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM, NEW YORK, NY : IEEE, US, 4 mai 2003 (2003-05-04), pages 2-15, XP010688798 ISBN: 0-7803-7688-9 le document en entier</p>	1-12

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande Internationale No

PCT/FR2005/000754

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 2581261 A	31-10-1986	FR 2581261 A1	31-10-1986
		CA 1266099 A1	20-02-1990
		JP 61253876 A	11-11-1986
		US 4684900 A	04-08-1987
GB 1068272 A	10-05-1967	US 3234483 A	08-02-1966
		FR 88181 E	03-06-1966